

УДК 624.01

ДО РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗАХ

Ю.А.КЛИМОВ – д.т.н., проф. Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, м. Київ

Наявність зон концентрації деформацій - бетону в області вершини критичної похилої тріщини, а поздовжньої і поперечної арматури в місцях перетинання критичної похилої тріщини, дозволяє розглядати залізобетонний елемент у зоні дії поперечних сил у виді дисково-зв'язкової системи, що складається з бетонних блоків, з'єднаних між собою податливими зв'язками. Відповідно до розташування основних тріщин і зон концентрації деформацій дисково-зв'язкову систему формують - блоки В1 і В2 і зв'язки, що моделюють відповідно бетон стиснутої зони над і під критичною похилою тріщиною, поздовжню арматуру в місцях перетинання критичної похилої тріщини, поперечну арматуру в місцях перетинання критичної похилої тріщини (рис. 1а).

Кінематична схема деформування системи представляється у вигляді повороту блоків В1 і В2 відносно горизонтальної осі границі стиснутої зони в перерізі I-I (рис. 1а). До утворення критичної похилої тріщини блоки, з'єднані між собою бетоном, повертаються на однаковий кут. Після утворення критичної похилої тріщини блоки з'єднані між собою поздовжньою і поперечною арматурою, наслідком деформування якої є їхній поворот на різний кут – відповідно

φ_1 і φ_2 (рис. 1а). Прийняті фізична модель і кінематична схема деформування дають логічне пояснення експериментальній картині напружено-деформованого стану елемента в зоні дії поперечних сил - перелому епюри деформацій (напруг) стиску бетону у вершині критичної похилої тріщини; характерному вигину поздовжньої арматури в місці перетинання критичної похилої тріщини, що свідчить про виникнення в арматурі нагельного зусилля; причинам виникнення сил зачеплення (при повороті на різний кут блоки В1 і В2 зміщуються один відносно одного, що при шорсткуватій поверхні блоків і відстані ними сумірною з отриманими переміщеннями, призводить до виникнення дотичних напруг зачеплення).

Розрахункова модель елемента логічно впливає з прийнятої фізичної моделі і розглядає в якості внутрішніх зусиль в елементі зусилля в зв'язках дисково-зв'язкової системи і виникаючі в процесі її деформування сили зачеплення між блоками В1 і В2 (рис. 1б).

Гранична поперечна сила, що сприймається елементом, визначається з рівняння рівноваги блока В1 на вертикальну вісь (рис. 16):

$$V = V_C + V_W + V_{Dowel} + F_{Friction} \sin \theta \quad (1)$$

Зусилля в бетоні над критичною похилою тріщиною знаходиться з розгляду граничної рівноваги зрізаного бетонного клину, завантаженого осью стискальною силою F_C - рівнодіючою поздовжнього і поперечного зусиль у бетоні N_C і V_C (рис. 16):

$$F_C = f_c b x (1 + 0,7 \beta) / \cos \beta \quad (2)$$

$$N_C = f_c b x (1 + 0,7 \beta) \quad (3)$$

$$V_C = f_c b x (1 + 0,7 \beta) \operatorname{tg} \beta \quad (4)$$

де x – висота бетону стиснутої зони над критичною похилою тріщиною; β – кут нахилу рівнодіючого зусилля в бетоні над критичною похилою тріщиною, що обчислюється по формулі, отриманої на підставі узагальнення, аналізу й обробки численних експериментальних даних:

$$\beta = \operatorname{arctg} \left[0,4 \frac{d}{a} \left(1 + \frac{d}{a} \right) \right] \leq \operatorname{arctg} \frac{d}{a} \quad (5)$$

Зусилля в поперечній арматурі визначається по формулі:

$$V_w = \frac{A_{sw}}{S} f_y c, \quad (6)$$

у якій довжина горизонтальної проекції критичної похилої тріщини C визначається з рівняння рівноваги моментів блока В1 відносно точки перетинання критичною похилою тріщиною поздовжньої арматури (рис.16).

Нагельне зусилля в поздовжній арматурі V_{Dowel} знаходиться з розгляду арматури в місці перетинання похилою тріщиною у вигляді умовного стрижня, забитого в блоки В1 і В2, кінці якого в процесі деформування елемента як дисково-зв'язкової системи повертаються разом із відповідними блоками на кути φ_1 і φ_2 , зміщуючись при цьому один відносно одного (рис.1а). При цьому величина V_{Dowel} визначається як поперечна сила в затисненому стрижні при повороті і зсуві його кінців:

$$V_{Dowel} = \frac{12E_s I_s}{l_3} c(\varphi_1 + \varphi_2) \left(1 + \frac{l_1 - 0,5l}{c}\right) \quad (7)$$

Довжина умовного стрижня l приймалася рівною сумі l_1 та l_2 (рис. 1а), що визначалися з розгляду поздовжньої арматури зліва і справа від місця перетинання критичною похилою тріщиною у вигляді балки, забитої в пружну основу, завантаженої силою зсуву V_{Dowel} . При цьому, як показав виконаний аналіз, у якості l_1 та l_2 із достатнім для розрахунку ступенем точності може бути прийнята відстань на який вертикальні переміщення і поперечна сила в забитому стрижні зменшуються практично до нуля, а момент, що згинає, зростає до максимального значення. Значення l_1 та l_2 визначалися виходячи з реальних умов деформування стрижня при різних значеннях коефіцієнтів постелі основи, що відповідають захисному шару при обчисленні l_1 і бетонному масиву при обчисленні l_2 (рис. 1а). У остаточному вигляді значення склали $l_1 = 1,44\sqrt{E_s / E_c d_s}$ та $l_2 = 2,54\sqrt{E_s / E_c d_s}$, де d_s – діаметр стрижня.

Кути повороту блоків визначаються виходячи з прийнятої кінематичної схеми деформування елемента як дисково-зв'язкової системи (рис. 1б) по:

$$\varphi_1 = \frac{\Delta_b}{x_0} = \frac{\varepsilon_{c,u} l_c}{x_0}; \quad \varphi_2 = \frac{\Delta_{c,1}}{x_0 - x} = \frac{\varepsilon_c l_c}{x_0 - x} \quad (8)$$

де x_0 – висота стиснутої зони в перерізі I-I, що визначається з розрахунку міцності в нормальних перерізах; $\varepsilon_{c,u}$ – граничні деформації бетону при стиску; l_c – довжина зони концентрацій деформацій, прийнята на підставі аналізу результатів експериментів рівною $l_c = 2,5x$; ε_c – деформації бетону в перерізі I-I під вершиною критичної похилої тріщини.

Величина V_{dowel} , обчислена по (7), обмежувалася з позицій можливості досягнення граничного стану (розколювання) бетону захисного шару і поздовжньої арматури. У першому випадку, в якості критерію досягнення граничного стану було прийняте досягнення напругами в бетоні на площадках розколювання граничних зна-

чень f_{ct} , а в другому – відоме вирішення теорії пластичності для випадку повздовжньо-поперечного вигину. Осьове зусилля в поздовжній арматурі в місці перетинання критичною похилою тріщиною при цьому визначалося з рівняння рівноваги блока В1 на горизонтальну вісь (рис. 1б):

$$N_s = N_c + F_{Friction} \cos \theta \quad (9)$$

Величина сил зачеплення, що діють уздовж критичної похилої тріщини, знаходиться, виходячи з прийнятої схеми деформування дисково-зв'язкової моделі по загальній формулі:

$$F_{friction} = \int_0^{l_{crc}} \Delta_{crc,i} G_{crc} b dl \quad (10)$$

де $\Delta_{crc,i} = \Delta_{crc} - l_i [1 - \cos(\varphi_1 - \varphi_2)]$ – зсув блоків В₁ і В₂ уздовж критичної похилої тріщини в аналізованій точці; $\Delta_{crc,i} = (x - x_0)(\varphi_1 - \varphi_2) / \cos \theta$ – зсув блоків у вершині критичної похилої тріщини; l_i – відстань від вершини тріщини до аналізованої точки; G_{crc} – модуль постелі зсуву поверхонь утворених тріщиною; l_{crc} – довжина тріщини, на якому діють сили зачеплення.

Враховуючи, що $\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \approx 1$, зсув блока В₁ по довжині критичної похилої тріщини можна прийняти постійним і рівним зсуву у вершині тріщини. Величина сил зачеплення при цьому обчислюється по формулі:

$$F_{friction} = \Delta_{crc} l_{crc} b G_{crc} \quad (11)$$

де $l_{crc} = a_{crc,u} / (\varphi_1 - \varphi_2)$; $a_{crc,u}$ – гранична ширина розкриття тріщин, при якому наявністю сил зачеплення можна знехтувати.

Для визначення значень G_{crc} і $a_{crc,u}$ були проведені спеціальні експериментальні дослідження, що містили в собі випробування зразків із штучно створеною тріщиною на зсув із контролем величини навантаження що прикладається і виміром відповідних деформацій зсуву. В якості чинників, що варіюються, приймалася міцність бетону (22...48 МПа) і ширина розкриття тріщин

($a_{crc} = 0,05 \dots 1,0$ мм). В результаті проведених досліджень були отримані дослідні залежності між дотичними напругами зачеплення, деформаціями зсуву і шириною розкриття тріщин, обробка й апроксимація яких дозволила одержати формулу для обчислення постелі зсуву – $G_{crc} = 13(1 - a_{crc})10^6$ кн/м³ (a_{crc} – у мм), а в якості $a_{crc,u}$ прийняти ширину розкриття тріщини, що дорівнює 1,0 мм. При визначенні величини сил зачеплення $F_{friction}$ по (11), із достатнім ступенем точності, у розрахунок може бути введене середнє значення коефіцієнта постелі зсуву по довжині критичної похилої тріщини, приймаючи, що у вершині тріщини $a_{crc} = 0$, а в розтягнутій зоні $a_{crc} = a_{crc,u}$.

З метою перевірки точності розробленого методу було виконано масове зіставлення розрахунку з експериментальними даними. Оброблена вибірка містила в собі більш 150 дослідних зразків із широким діапазоном варіювання основних чинників, що впливають на несучу здатність, таких як: відносна відстань від опори до зосередженої сили $a/d = 1,5 \dots 7,04$; інтенсивність поперечного армування $\rho_w = 0 \dots 0,0042$; поздовжнє армування $\rho_l = 0,0052 \dots 0,037$; міцність бетону $f_c = 18,8 \dots 50,0$ МПа. При цьому встановлено, що розроблений метод має достатньо високу точність, правильно відтворює вплив основних чинників на несучу здатність елементів і дозволяє встановити реальну картину розподілу внутрішніх зусиль у похилому перерізі на стадії руйнування. Так, за даними виконаних розрахунків, бетон стиснутої зони над критичною похилою тріщиною сприймає 44...78% від діючої поперечної сили на стадії руйнації, поперечна арматура – 15...50%, нагельне зусилля в подовжній арматурі – 9...30%, сили зачеплення – 6...31%, що в цілому узгоджується з дослідними даними.

В розвиток описаної вище розрахункової моделі були розроблені відповідні моделі для елементів таврового перерізу, попередньо напружених елементів при різноманітних умовах і режимах завантаження.

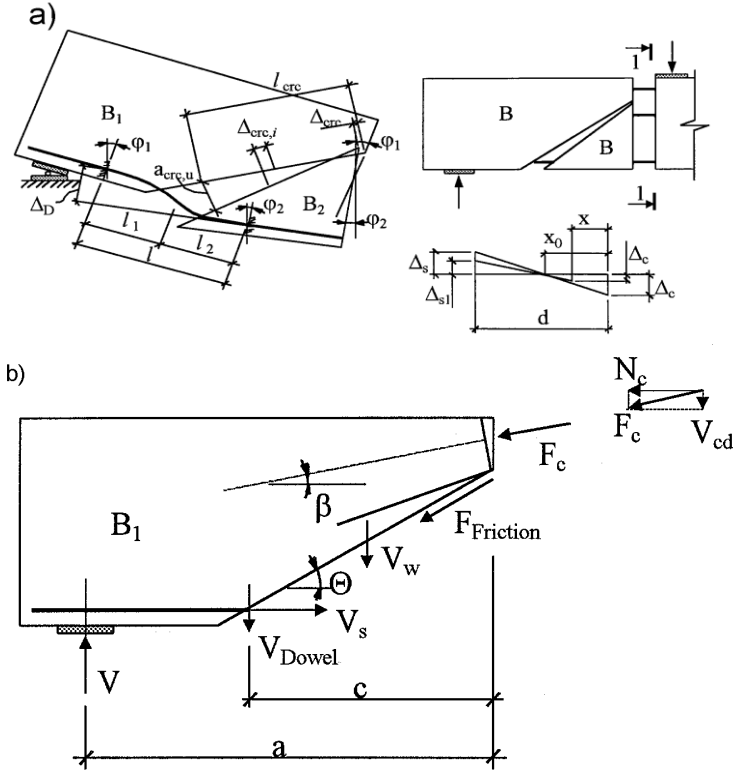


Рисунок 1. Фізична модель, кінематична схема деформування (а) і розрахункової схеми елемента (б).

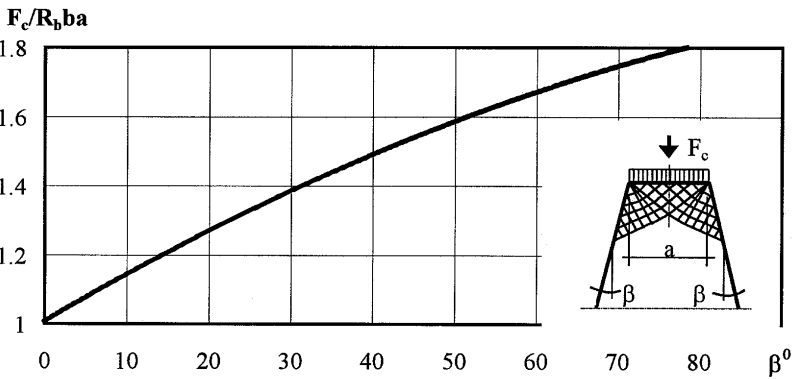
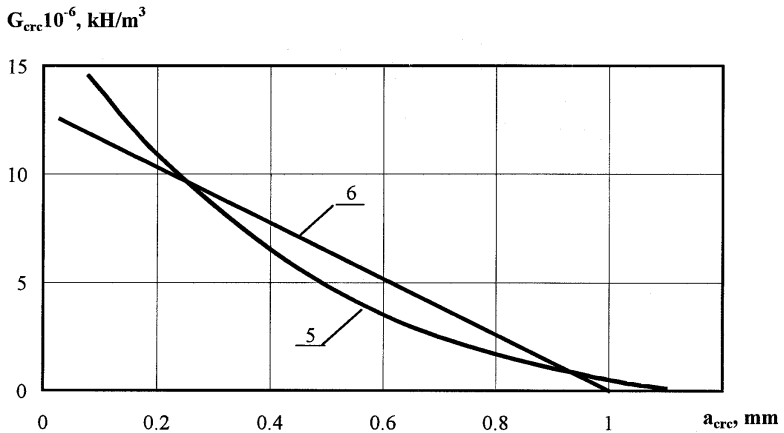
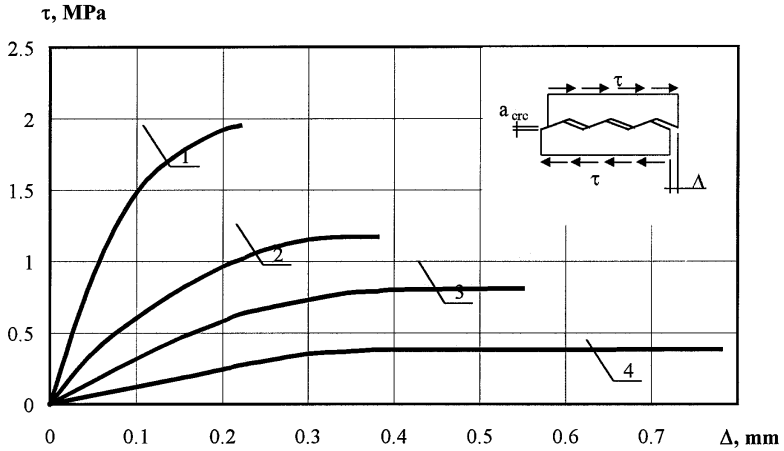


Рисунок 2. Теоретична залежність граничного навантаження F_c від кута нахилу клина.



а – залежність дотичних напруг від деформацій зсуву при ширині розкриття тріщини 0,05...0,15 мм – (1); 0,2...0,3 мм – (2); 0,4...0,6 мм – (3); 0,7...1,0 мм – (4); б – дослідна (5) і розрахункова (6) по формулі (12) залежності коефіцієнта постелі зсуву від ширини розкриття тріщини.

Рисунок 3. Результати експериментальних досліджень сил зачеплення.